

# 水下油气水平释放与垂直释放时扩散规律的比较

杨云朋<sup>1</sup>, 张 军<sup>2</sup>, 吕国录<sup>1</sup>, 刘志萌<sup>1</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学机械与能源工程学院;  
福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了比较油气水平释放及垂直释放时的扩散规律, 利用 Gambit 软件, 建立水槽模型, 在 FLUENT 中进行溢油后油气扩散的模拟, 分析了不同泄漏方向及不同泄漏速度下油气的扩散规律与分布情况。模拟结果表明: 油气分别在水平泄漏和垂直泄漏后的运动轨迹不同, 前者呈 J 形, 后者呈 S 形; 水平泄漏的扩散范围相比垂直泄漏的扩散范围大, 垂直泄漏到达水面需要的时间较短; 泄漏速度越大, 油气扩散的速度就越快, 污染的范围就越广。

**[关键词]** 海底油气; 数值模拟; 水平泄漏; 垂直泄漏; 扩散规律

**[中图分类号]** X 55

## Comparative of Diffusion Law Between Horizontal Release and Vertical Release of Underwater Oil and Gas

YANG Yunpeng<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, LYU Guolu<sup>1</sup>, LIU Zhimeng<sup>1</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University; Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The diffusion law of horizontal release and vertical release of underwater oil and gas are numerically simulated in this paper. Gambit software was used to establish the tank model, and the simulation of oil and gas diffusion after oil spill was carried out by FLUENT. The movement and distribution of oil and gas under different leakage directions and different leakage velocities were analyzed. The simulation results show that the trajectory of oil and gas are different between horizontal leakage and vertical leakage, the former is in J shape and the latter is in S shape, and horizontal leakage has a larger range of diffusion than vertical leakage, it takes a shorter time to reach the water surface vertically; The greater the rate of leakage, the faster the diffusion of oil and gas, and the wider the range of pollution.

**Keywords:** submarine oil and gas; horizontal leakage; vertical leakage; law of motion; distribution

## 0 引言

近年来, 随着海上石油工业的发展, 海底输油管道扮演着越来越重要的角色, 国内海底输油管道

**[收稿日期]** 2017-09-22 **[修回日期]** 2017-10-20

**[基金项目]** 福建省科技计划项目(2017H0024)

**[作者简介]** 杨云朋(1990—), 男, 硕士生, 从事水下油气泄漏研究。通信作者: 张军(1966—), 男, 副教授, 博士, 从事多相流动、海洋工程及海洋能综合利用、海底油气泄漏、流体机械优化等研究, E-mail: bull0202@sina.com。

的总长已经超过 3000 km<sup>[1]</sup>, 且在逐年增加。不可否认, 这些水下管道在石油天然气输运中发挥着愈来愈重要的作用。但是, 管道因腐蚀及其他人为因素而发生油气泄漏的潜在风险也日益增大, 油气泄漏会给当地环境造成巨大影响。在 2010 年和 2011 年连续发生了两起溢油事件, 即: 美国墨西哥湾的“深水地平线”事件与“蓬莱 19-3 溢油”事件, 进一步反映了海底溢油事故对海洋环境造成的重大影响, 因此对水下泄漏及溢油输运的研究具有重要意义。目前, 国内外专家学者在该领域做了大量的研究。Qistein Johansen 提出了一个在深水条件下的海上井喷模型——羽流模型<sup>[2]</sup>; Chen F 等<sup>[3]</sup>在深水井喷模型中考虑了油、气分离的情况, 表明: 油、气分离对羽流有重要影响; Yapa P D 等<sup>[4]</sup>对深水中石油和天然气的运动进行了分析研究, 并在石油中使用了分散剂等添加剂观察石油的变化; Hissong D W 等<sup>[5]</sup>建立了一种理论模型来预测羽流轨迹及羽流尺寸大小, 该模型适用于气体和液态烃的释放, 预测羽流在静水压力下上浮过程的蒸发和膨胀, 对水下碳水化合物化合物的释放进行模拟评估很有价值; Premathilake L T 等<sup>[6]</sup>主要是针对水下天然气井喷进行事先的风险评估与预测, 为事后的应急处理提供理论基础; Chen H 等<sup>[7]</sup>运用深海羽流模型模拟深水溢油, 现应用于模拟假设中国南海深水溢油, 特别是对前 48 h 的溢油过程和溢油在水下的分布进行模拟预测; 刘彦呈等<sup>[8]</sup>建立的数学模型对海上溢油的运动规律进行了数值模拟, 并在海上溢油应急反应地理信息系统 (GIS) 平台上, 进行了动态模拟, 为海上溢油的应急处理提供了科学依据; 张军等<sup>[9]</sup>对水下管道向下泄漏的羽流特性进行了实验及理论研究, 采用拉格朗日控制体积分法建立了向下运动的羽流动力模型, 并对羽流参数进行了模拟; 钱国栋等<sup>[10]</sup>利用水下溢油模拟装置对“蓬莱 19-3 溢油”事件进行了实验模拟, 观测油滴的体积分布和粒径, 得出: 油滴粒径的分布范围主要在 100 ~ 700 μm 之间, 体积比与喷射条件有关的结论; Niu X 等<sup>[11]</sup>使用了一种基于拉格朗日粒子示踪方法的模型来模拟油气在海底溢油的扩散行为, 从泄漏点处提取大量的具有代表性的油滴和气泡建模, 并分为几组来模拟不同成分的油气泄露, 该模型与以往的模型相比, 在模拟成分复杂的原油时更有优势。

综上所述, 目前有关油气泄漏的研究大多数是针对垂直方向上的释放, 在水平方向上释放的研究较少, 所以对水平方向的泄漏研究也就有了一定现实意义。本文同时对水平和垂直方向上的溢油做了对比性研究, 旨在为溢油事故的应急响应提供一定的理论指导。

## 1 控制方程

鉴于 Wilkening 等<sup>[12]</sup>的研究: 二维与三维的数值模拟计算结果具有很好的相似性。结合现有的计算机配置, 考虑计算时间关系, 本文选用二维计算模型, 对水下油气两相混合物分别在水平和垂直方向释放时的运动规律进行对比研究。

### 1.1 数学模型

根据流体运动学和流体动力学理论所建立的求解模型

1) N-S 方程:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j u_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \\ &\quad 2/3(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i})\delta_{ij}] + S_i; \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 1, i = j, \\ 0, i \neq j; \end{cases} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中:  $\rho$  为密度;  $P$  为流体微元体上的压强;  $\delta_{ij}$  为单位二阶张量的分量;  $\mu$  为粘性系数;  $\mu_t$  表示湍动黏度;  $k$  为湍动能;  $S_i$  为广义源项。

$k - \varepsilon$  模型的运输方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \mu_t/\sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - \rho \varepsilon; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \mu_t/\sigma_k) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon}/k \varepsilon G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2/k_0. \quad (3)$$

其中: $\mu_t$ 表示湍动黏度;参数 $G_k$ 由平均速度梯度引起的湍动能所产生; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 均取默认值,其中 $C_{1\varepsilon}=1.44$ , $C_{2\varepsilon}=1.92$ , $\sigma_k=1.0$ , $\sigma_\varepsilon=1.3$ ;  $k$ 为湍动能; $\varepsilon$ 为湍动耗散率。

3) VOF 模型

油气混合物进入水中后得到多种不相容流体的交界面,是一种典型的三相流 VOF 处理模型。引入体积分数, $\eta_\lambda$ 表示第 $\lambda$ 相的体积分数,根据 FLUENT 中 VOF 模型的使用限制,则满足下列方程:

$$\sum_{\lambda=1}^n \eta_\lambda = 1, (n = 1, 2, 3)。$$

(4)

1.2 物理模型

20 m×20 m 的二维平面由 Gambit 建立,划分网格,设置好边界条件后导入 FLUENT 软件,利用 FLUENT 中的 patch 等相关命令建立一个数值水槽。水槽左右端面为海流出入口,与泄漏口的边界条件同设为速度入口,水槽上下端面设为壁面边界条件。水深的变化对泄漏油气的运动轨迹有很大影响,本文用 FLUENT 中的默认值,水平泄漏口位于数值水槽的左端面,距离底部 1m 高的位置;垂直泄漏口位于水槽底部,距离左端面 1m 处。海底输运的原油密度一般在 830~970 kg·m<sup>-3</sup>之间,动力粘度在 0.1~1.338 Pa·s 之间,而 0#柴油的密度为 835 kg·m<sup>-3</sup>,动力黏度约为 0.1 Pa·s,二者的物理性质较为接近,所以泄漏的原油用柴油代替,气体为甲烷。水平泄漏与垂直泄漏的数值水槽模型如图 1 所示。

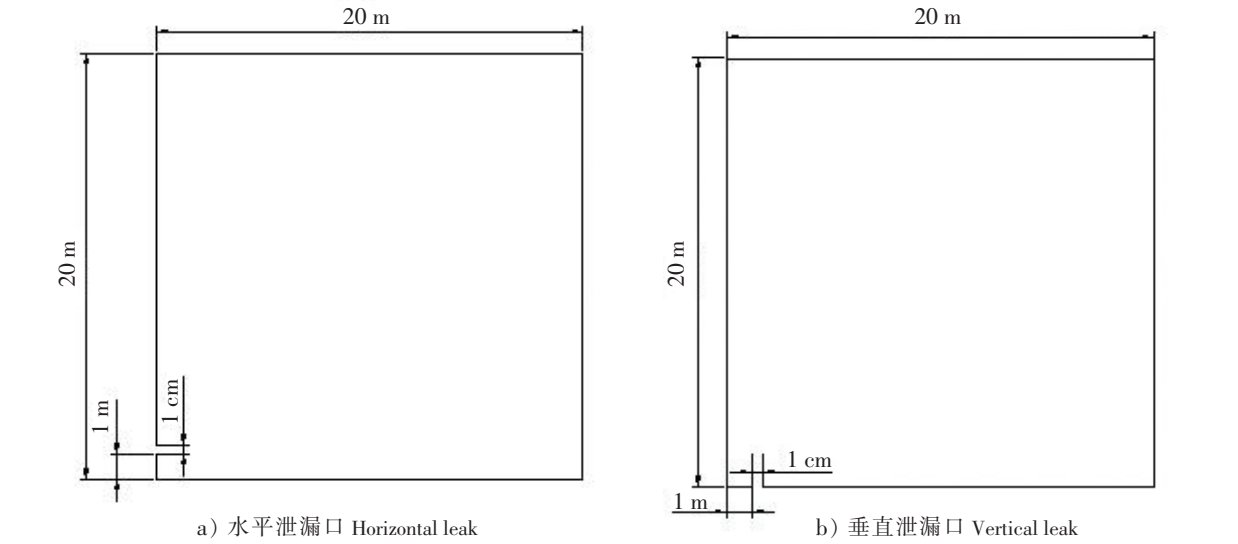


图 1 水槽模型  
Fig.1 Flume model

1.3 数值计算

本文的数值计算基于 FLUENT 中的 VOF 模型,采用 PISO (pressure implicit with splitting of operators) 算法,研究在不同的海流速度和不同泄漏方向上溢油的运动及分布规律。一些相关的计算参数如表 1 所示:

表 1 模型参数  
Tab.1 Model parameters

泄漏孔径 Leakage diameter /m	水深 Water depth /m	含气率 Gas content /%	泄漏速度 Leakage velocity /(m·s <sup>-1</sup> )	海流速度 Current velocity /(m·s <sup>-1</sup> )	流体密度 Fluid density/(kg·m <sup>-3</sup> )		
					水 Water	原油 Crude oil	甲烷 Methane
0.01	20	10	3,5,7	0.2	998.2	835	0.668

2 数值模拟计算结果

2.1 不同泄漏速度下溢油的运动规律

泄漏速度的大小体现了原油在离开输油管道时初始动量的大小,初始动量是决定射流长度的主要

因素，射流长度与初始动量的大小成正比。本文设定恒定海流速度大小为 0.2 m/s，油、气体积比为 9:1，对泄漏速度分别为 3 m/s，5 m/s，和 7 m/s 的油气在水平和垂直方向上进行数值模拟。

1) 水平方向上的泄漏情况

同一时刻  $t = 30\text{ s}$  时，水平方向不同泄漏速度下油气在海水中的运动分布规律如图 2 所示。

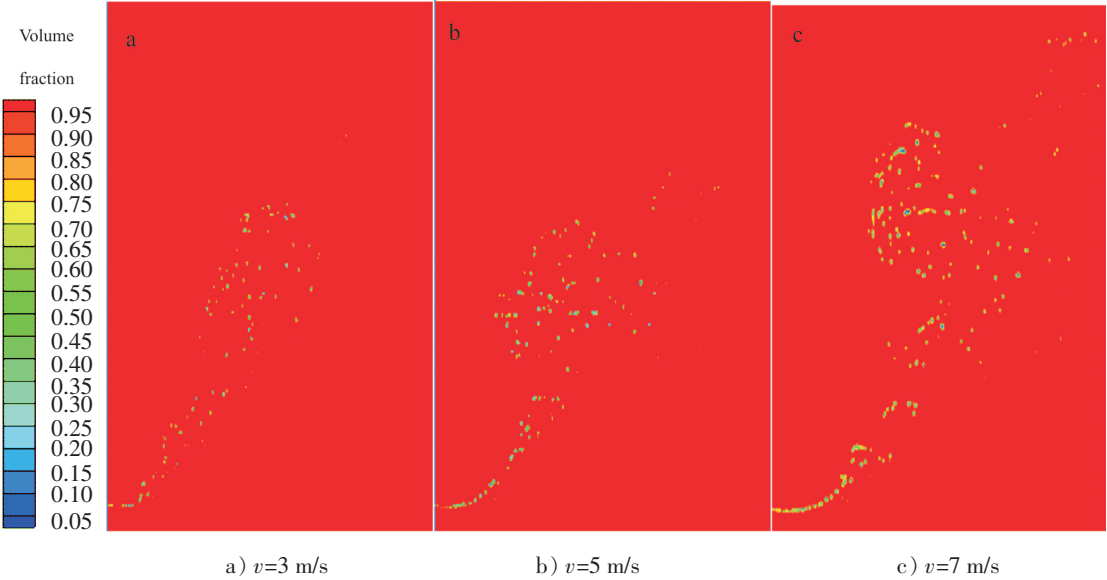


图 2  $t=30\text{ s}$  时不同泄漏速度下油气水三相的分布规律  
Fig.2 Distribution law of oil,gas and water phases at different leakage velocities in 30 seconds

从图 2 可以看出，油气在不同泄漏速度下泄漏后的运动轨迹大致相同，初始阶段浮射流轴线呈 J 形，在初始动量和浮力作用下向上弯曲，随着流程的增大，在浮力和海流的共同影响下，由于紊动作用不断卷吸周围的海流，大油滴破碎成小油滴，形成羽流，周围海水被不断卷吸进来，随着时间的推移，羽流面积扩大，羽流混合物密度不断增大，羽流上升速度减慢，通过浮射流段的轴线曲率变化可以看出，浮射流速度在水平方向上的分量在减小，垂直方向上的分量在增大，油滴的分布在初始阶段为带状的浮射流，在浮射流的末端油滴分散成小的油滴形成羽流，泄漏速度越小越早形成羽流。

随着泄漏速度的增加，浮射流的初始动量变大，原油扩散的速度加快。水平方向上的泄漏速度与海流速度方向相同，泄漏速度与海流速度耦合，加快了油气的扩散速度，扩大了污染的范围，加大了原油回收以及污染治理的难度。水平射流到达海面的时间由射流和海水的密度差决定，从泄漏口喷出来的射流受到浮力的作用，并且因为垂直方向上初始动量很小，主要在浮力作用下向上流动扩散，在垂直方向上的运动属于浮羽射流。油滴的扩散还与原油的动力粘度以及密度有关，动力粘度主要影响油滴之间的距离，动力粘度越大，油滴越难以分离成小的油滴，原油的密度越大与海流的密度越接近，油滴受到浮力也就越小，在垂直方向上的扩散速度就越小。

2) 垂直方向上的泄漏情况

同一时刻  $t = 30\text{ s}$  时，垂直方向不同泄漏速度下油气在海水中的运动分布规律如图 3 所示。

从图 3 可以看出，油气在不同泄漏速度下泄漏后的运动轨迹大致相同，初始阶段浮射流轴线呈 S 形，在浮射流的中段轴线向下弯曲，泄漏速度越大弯曲程度越明显，在浮射流的尾端小油滴开始形成，并产生分离，形成羽流，羽流随着海流向外扩散，泄漏速度较小时，泄漏的油滴团较小，随着泄漏速度的增大，伴有明显的油带和较大的油滴团，扩散范围更大。

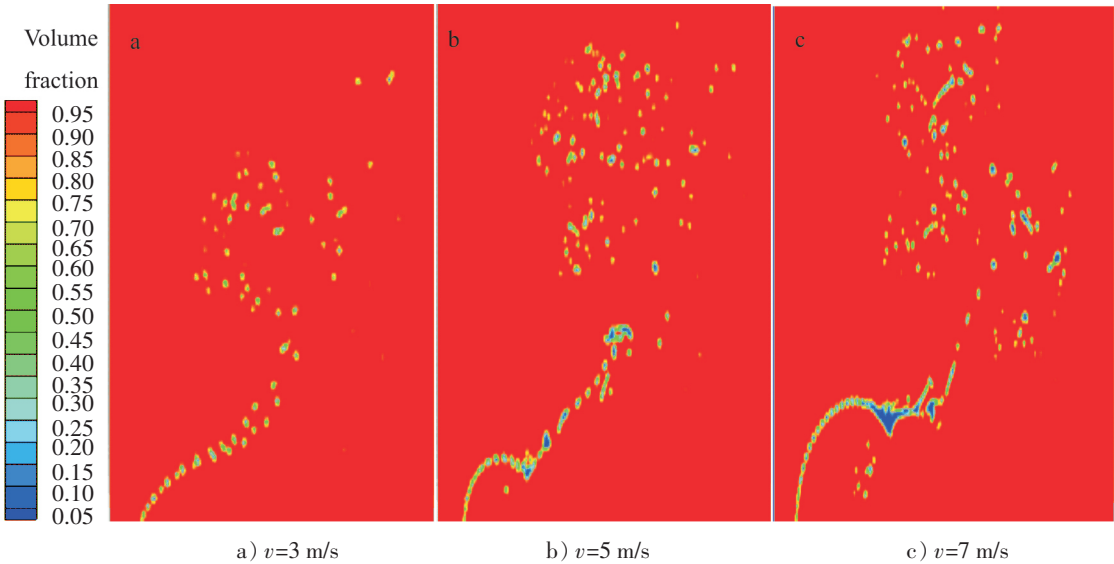


图 3  $t=30\text{ s}$  时不同泄漏速度下油气水三相的分布规律

Fig.3 Distribution law of oil,gas and water phases at different leakage velocities in 30 seconds

随着油气向上泄漏速度的增大,油气到达水面的时间越短。浮射流段出射速度一定,垂直方向上受重力、浮力以及流体粘度所产生的内摩擦力等的影响,做变加速度运动,速度在减小,直至初始动量耗尽。油气在出射时所携带的动能会对附近局部海流产生扰动,出现卷吸现象,局部伴有旋涡造成海流运动紊乱,在海流的共同作用下溢油的运动轨迹出现如图 3 向右下弯曲的情况。受到卷吸掺混的作用,小油滴分离,并与水结合形成密度较大的羽流,在浮力的作用下油滴做加速度逐渐减小的加速运动,随着海流向外继续扩散。泄漏速度较小时,油气主要以羽流的形态出现,随着海水流动向外扩散。当泄漏速度增大时,出现明显的油带,在多种扰动下横向传播速度加快,扩大了受灾面积,加大了治理回收的难度。

2.2 水平方向与垂直方向的对比

图 2、图 3 均是在以海水为主相的条件下所呈现的油气水三相分布相图,可以看出:

- 1) 在相同海流环境下,两种同速率不同方向的溢油,前期的运动轨迹是不同的。水平方向的泄漏,浮射流轴线呈 J 型;垂直方向的泄漏,浮射流轴线呈 S 型。后期扩散都是以羽流的形式,受海流和浮力的共同影响。
- 2) 垂直方向溢油到达水面的时间相比水平方向溢油需要的时间较短。在同一泄漏速度下,垂直方向的初始速度较大,而水平泄漏在垂直方向上的初始速度为零。相同水深时垂直方向上的溢油最早到达水面。另外,水平泄漏相比垂直泄漏的影响范围更大,水平泄漏油气所具有的初始速度与海流速度耦合,增加了污染范围。

3 结论

- 1) 泄漏速度的大小决定了油滴初始动量的大小,对溢油的扩散范围影响较大。泄漏速度越大,尤其与海流速度结合,会加快油气混合物的扩散,污染范围扩大,增加了回收原油及治理海洋污染的难度。
- 2) 水平方向和垂直方向油气泄漏的主要区别在于初始阶段的运动轨迹不同,前者为 J 形,后者为 S 形;到达水面的时间,垂直泄漏用时较短;泄漏后的污染范围,水平泄漏影响较大。
- 3) 本次的数值模拟可以为海底输油管道泄漏点的预测及原油的回收提供较为可靠的基础数据,有利于准确评估水下油气扩散的范围,能够及时为相关部门提供理论指导及技术支持。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 焦向东, 周灿丰, 陈家庆, 等. 21 世纪海洋工程连接技术的挑战与对策 [J]. 电焊机, 2007(6): 23-27.
- [2] QISTEIN JOHANSEN. DeepBlow a lagrangian plume model for deep water blowouts [J]. Spill Science& Technology Bulletin, 2000, 6(2): 103-111.
- [3] CHEN F, YAPA P D. Modeling gas separation from a bent deepwater oil and gas jet/plume [J]. Journal of Marine Systems, 2004, 45(45): 189-203.
- [4] YAPA P D, WIMALARATNE M R, DISSANAYAKE A L, et al. How does oil and gas behave when released in deepwater [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2012, 6(4): 275 - 285.
- [5] HISSONG D W, POMEROY J, NORRIS H L. A mechanistic model for hydrocarbon plumes rising through water [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30(1): 236-242.
- [6] PREMATHILAKE L T, YAPA P D, NISSANKA I D, et al. Impact on water surface due to deepwater gas blowouts [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 112(1-2): 365-374.
- [7] CHEN H, AN W, YOU Y, et al. Numerical study of underwater fate of oil spilled from deepwater blowout [J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 227-243.
- [8] 廖国祥, 高振会. 水下溢油事故污染物输移扩散的数值模拟研究 [J]. 海洋环境学, 2011, 30(4): 578-582.
- [9] 张军, 臧晓刚, 张园春, 等. 水下管道向下泄漏的羽/射流特性 [J]. 化工学报, 2016, 67(12): 4969-4975.
- [10] 钱国栋, 赵宇鹏, 于顺. 蓬莱 19-3 原油水下溢油的模拟实验 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 901-907.
- [11] NIU X, LI X, YU X. A model to simulate the spreading of oil and gas in underwater oil spills [C] //APAC (The 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts). [s.l.]: Hasanuddin University Press, 2013.
- [12] WILKENING H, BARALDI D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2206-2215.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)